

# 棒材同士の衝突を考慮したテンセグリティダイナミクスの導出

60200125 山崎達彦

発表日 2019 年 11 月 21 日

## 1 テンセグリティ構造について

### 1.1 現在、どの程度実用化されているのか

現在、テンセグリティ構造は宇宙構造物や大型構造物への利用期待されており、開発レベルであるものが多い。テンセグリティ構造は外力に対しての剛性も強いという特徴がある。そのため、惑星の探査ロボットのように着陸時に衝撃が加わるものへの応用も検討されている。具体例としては、NASA で Super ball-bot[1] という探査ロボットが開発されている。

### 1.2 得られたダイナミクスは、どのように利用されるのでしょうか？

テンセグリティを実際に運用する場合には、事前に適切な運動学モデルを用いて安全性の検証を行う必要がある。また、前述の探査ロボットの場合は、制御を行う際にダイナミクスが必要である。それらの場合に得られたダイナミクスが利用される。

### 1.3 テンセグリティはどのぐらいの大きさまで展開することができますか？

構造によって異なる。具体例として以下のような構造を示す。

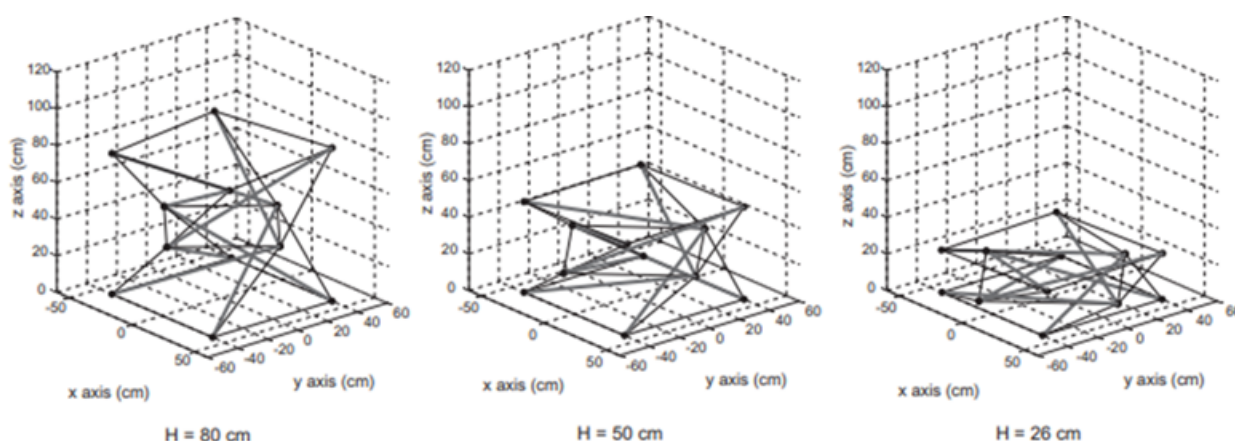


Fig.1 Clustered tensegrity

### 1.4 衝突の際は軸力以外の力も加わるような気がするが、それによる影響はないか

今回の研究では、棒材は変形しない剛体としてモデル化を行っているため、本研究では、棒材の曲げは考慮していない。

## 1.5 棒材が衝突するほど変形した場合、テンセグリティ構造が壊れてしまったりしないのか

折り畳みの際に起こる衝突については、テンセグリティ構造が壊れてしまうことはないと思うが、地震で構造が揺れてしまった場合など大きい力がかかった場合には、壊れることもあると考えられる。今回の研究では、崩れることを考慮できていない。実際に設計する場合には、そのようなことを考慮する必要があると考えている。

## 1.6 自立している状態と棒材が衝突するほどの状態と差があるような気がする (中嶋先生)

今回の研究では、構造が崩れたり、棒材が折れてしまったりする場合を考慮していないため、このモデルが成り立っている。しかし、それが考慮できていないため、大きな力が加わった場合には、実際の動きと異なる動きをする可能性がある。

# 2 研究内容について

## 2.1 この研究の新規性は何か

テンセグリティ構造は、宇宙構造物のほかに、移動式の建物や大型アンテナへの利用が期待されている。そのように地球上で使用するものは、地震や台風の影響で大きく構造が変形し、棒材同士が衝突してしまう場合が考えられる。衝突を考慮したテンセグリティダイナミクスは従来研究 [2] で導出されていますが、それには、計算の繰り返しが起こってしまう場合が考えられる。そのような場合にも使用することができるようになるため、線形相補性問題を用いてその繰り返しを行うことを考えた。線形相補性問題を用いて衝突をモデル化した論文はないため、そこが新規性にあたると考えられる。

## 2.2 問題の解決方法について詳しく教えてください

今回シミュレーションで用いた線形相補性問題は以下になる。

$$\ddot{\mathbf{d}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\lambda}_c + \mathbf{a} \quad (1)$$

$$\ddot{\mathbf{d}} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda}_c \geq \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\ddot{\mathbf{d}}^T \boldsymbol{\lambda}_c = 0 \quad (3)$$

これを用いた場合、加速度のみを用いて接触判定を行う必要がある。位置レベルである棒材の相対距離で衝突を判定する場合には、 $\mathbf{d} = \mathbf{0}$  として行われるが、加速度を用いた場合にはどのように起こるかがわからないということである。そこで、位置レベルの線形相補性条件に Newmark $\beta$  法を用いて近似することによって線形相補性問題は以下になる。

$$\mathbf{d} = \mathbf{A}\boldsymbol{\lambda}_c + \mathbf{a} \quad (4)$$

$$\mathbf{d} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda}_c \geq \mathbf{0} \quad (5)$$

$$\mathbf{d}^T \boldsymbol{\lambda}_c = 0 \quad (6)$$

$\mathbf{d} = \mathbf{0}$  は常に満たすため、 $\mathbf{d} = \mathbf{0}$  の場合に接触判定が行われ、接触力が発生するようになると考えられる。

## 2.3 速度レベルの拘束は考えていますか？

速度レベルの拘束も加速度レベルと同様に接触判定をどのようにして行うのが不透明なため、行うことは考えていない。

## 2.4 撃力や反発係数も考慮されたモデルとなっていますか？ (土橋先生)

発表の時は反発係数  $e = 1$  としてモデル化していると言ったが、実際は  $e = 0$  としてモデル化されていた。

## 2.5 このシミュレーションでは、目的状態へ移行する動作を逆運動的に導出することは可能か

本研究はダイナミクスを扱っており、制御はしていないためそのようなことはできない。

## 2.6 従来の線形相補性問題は $\mathbf{d} = \mathbf{0}, \dot{\mathbf{d}} = \mathbf{0}$ でのみ使用できるもので、線形相補性問題を用いることによって同して $\mathbf{d} = \mathbf{0}, \dot{\mathbf{d}} = \mathbf{0}$ でも使えるようになるのか (中嶋先生)

衝突は、 $\mathbf{d} = \mathbf{0}$  の場合に起こると定義することができます。従来手法を用いた場合には、特に  $\mathbf{d} = \mathbf{0}$  かつ  $\dot{\mathbf{d}} = \mathbf{0}$  の場合に計算の繰り返しが起こる可能性があります。その計算の繰り返しを回避する方法として文献 [4] で線形相補性問題による解法が提案されています。

## 3 シミュレーションについて

### 3.1 シミュレーションが間違っているというのは、衝突の判定が行われていないのか、判定されているが適切ではないのかどちらですか？

現在のシミュレーションでは、接触判定を加速度レベルの線形相補性問題を用いて行っています。接触は位置レベルの場合、相対距離が 0 と考えることができる。現在の相補性条件は以下のようになる。

$$\ddot{\mathbf{d}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\lambda}_c + \mathbf{a} \quad (7)$$

$$\ddot{\mathbf{d}} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda}_c \geq \mathbf{0} \quad (8)$$

$$\ddot{\mathbf{d}}^T \boldsymbol{\lambda}_c = 0 \quad (9)$$

しかし、加速度レベルではどのようにして接触を定義することができるのかが現在わかっていない。そのため、接触の判定が行われていないと考えられる。

### 3.2 シミュレーションの成功、失敗の判定はどのようにされるのですか？

棒材同士の距離は常に計算することができるため、棒材同士の距離がその棒材の半径以上になっている場合に成功と判定することができると考えている。

## 4 Newmarl $\beta$ 法について

### 4.1 Newmarl $\beta$ 法が使われた理由は何ですか？

シミュレーションで誤った結果になっている原因は、相補性条件 (式 (8), (9)) の中の  $\ddot{\mathbf{d}} \geq \mathbf{0}$  という条件では、衝突の拘束条件を表していないと考えたためである。それを解決するために、加速度と速度を位置に近似するし、 $\mathbf{d} \geq \mathbf{0}$  とすることによって、衝突の拘束条件と考えることができるようにすることを考えた。テンセグリティは硬い系 (stiff system) である。そのため、そのような系に対しても係数を適切に選ぶことによって収束が保証されている Newmarl $\beta$  法を用いることを考えた。

### 4.2 Newmarl $\beta$ 法とはどのような方法ですか？

Newmarl $\beta$  法は時刻  $t + \Delta t$  と時刻  $t$  での位置、速度の関係を以下の式で仮定する方法である。

$$\dot{\mathbf{q}}_{n+1} = \dot{\mathbf{q}}_n + \Delta t \{ \gamma \ddot{\mathbf{q}}_{n+1} + (1 - \gamma) \ddot{\mathbf{q}}_n \} \quad (10)$$

$$\mathbf{q}_{n+1} = \mathbf{q}_n + \Delta t \dot{\mathbf{q}}_n + \Delta t^2 \left\{ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{\mathbf{q}}_n + \beta \ddot{\mathbf{q}}_{n+1} \right\} \quad (11)$$

私の研究ではこの式を変形して、 $\dot{\mathbf{q}}_{n+1}$ と $\ddot{\mathbf{q}}_{n+1}$ を $\mathbf{q}_{n+1}$ で近似することを考えた。近似式は以下のようになる。ここで、 $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{Q}$  はそれぞれ、時刻  $n + 1$  以外の項である。

$$\dot{\mathbf{q}}_{n+1} = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{q}_{n+1} + \mathbf{P} \quad (12)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_{n+1} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}\mathbf{q}_{n+1} + \mathbf{Q} \quad (13)$$

#### 4.3 Newmarl $\beta$ 法を用いると、 $\mathbf{d} = 0, \dot{\mathbf{d}} = 0$ 以外の場合も使えるようになる理由がよくわからない

相補性条件の $\ddot{\mathbf{d}} \geq \mathbf{0}$ が、 $\mathbf{d} \geq \mathbf{0}$ となり、衝突の拘束条件を満たすようになるため、変換することを考えた。

### 5 今後の研究について

#### 5.1 (研究計画書の) 簡単なモデルとはどのようなモデルを想定しているのか

まずは、発表でも示したような剛体の棒同士が接触するモデルのシミュレーションを行おうと考えている。

#### 5.2 今後は実際に構造物をシミュレーションする予定はありますか？

簡単なモデルでのシミュレーションを行った後、大きな構造のシミュレーションを行い、理論の妥当性の検証を行おうと思っている。

#### 5.3 棒材同士の衝突がテンセグリティ構造の設計等で生きてくるのでしょうか？

地震や折りたたみの際に棒材同士が衝突した場合に、棒材を衝突を考慮していない実際の動きとは異なる計算結果が得られている。そのため、棒材同士の衝突を考慮したテンセグリティダイナミクスを導出する必要がある。

### 参考文献

- [1] Agogino, Adrian K., Vytas SunSpiral, and David Atkinson. "Super Ball Bot-structures for planetary landing and exploration." (2018).
- [2] Kan, Ziyun, et al. "Investigation of strut collision in tensegrity statics and dynamics." International Journal of Solids and Structures 167 (2019): 202-219.
- [3] Kan, Ziyun, Haijun Peng, and Biaoshong Chen. "Complementarity framework for nonlinear analysis of tensegrity structures with slack cables." AIAA Journal 56.12 (2018): 5013-5027.
- [4] Bernard Brogliato. "Nonsmooth mechanics" . Springer, third edition, (2016)